

## UNA APROXIMACIÓN PARA ESTIMAR LA EFICIENCIA DEL QUEMADO USANDO PRODUCTOS SATELITALES. CASO DE ESTUDIO: MÉXICO

MARÍA ISABEL CRUZ LÓPEZ

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)  
Liga Periférico - Insurgentes Sur 4903,  
Parques del Pedregal, Del. Tlalpan, Ciudad de México. 14010. México  
[icruz@conabio.gob.mx](mailto:icruz@conabio.gob.mx)

### RESUMEN

Los incendios forestales son una de las variables climáticas esenciales en las investigaciones del calentamiento global, debido entre otros factores, a los gases de efecto invernadero (GEI) que generan. Conocer la distribución espacial y temporal de las emisiones es fundamental para establecer medidas de mitigación. Sin embargo, aún persiste incertidumbre en el cálculo de los parámetros involucrados para su estimación, como la eficiencia del quemado (EQ); definida como la fracción de la biomasa consumida por el fuego (Seiler y Crutzen, 1980). Este trabajo propone un camino para estimar la EQ con datos de Observación de la Tierra (OT), de campo y el algoritmo *Random Forest*, que proporcione información específica para cada área y contribuya a mejorar la estimación de emisiones de los GEI. Los resultados indican la relación de la EQ con las diferencias espaciales del combustible y las condiciones meteorológicas.

Palabras clave: emisiones, incendios, imágenes de satélite, MODIS, *Random Forest*.

### AN APPROACH TO ESTIMATE THE BURNING EFFICIENCY USING SATELLITE PRODUCTS. CASE STUDY: MEXICO

### ABSTRACT

Forest fires are considered an Essential Climate Variable in Global Warming researches, due to the greenhouse gases (GHG) they emit. To identify the spatial and temporal distribution of emissions is necessary to design mitigation actions. However, uncertainties exist when calculating the parameters involved into its estimation, such as the burning efficiency; define as the biomass burned on particular area (Seiler y Crutzen, 1980). This work proposes a method to estimate burning efficiency using Earth Observation Data, field data and Random Forest algorithm, that gives us specific information over each burned area and enhance the emission estimation of GHG. The results show the relation between burning efficiency and spatial differences of fuel and meteorological conditions.

Keywords: emissions, fires, satellite images, MODIS, Random Forest.

Recibido: 11/03/2017

Aceptada versión definitiva: 12/01/2018

Editor al cargo: Dr. Pere Serra

**Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0)**

© Los autores  
[www.geofocus.org](http://www.geofocus.org)

## 1. Introducción.

México es un país megadiverso como resultado de las condiciones geográficas que caracterizan su territorio, situación que lo posiciona en el cuarto lugar dentro de los 17 países que albergan aproximadamente el 70 % de las especies conocidas (Espinosa *et al.*, 2008). En las últimas décadas la diversidad de especies se ha visto afectada por los incendios forestales que han sido más frecuentes e intensos. Actualmente en México se reporta un promedio anual de 7 000 incendios, con una superficie afectada de 240 000 ha (CONAFOR, 2016). La quema de biomasa no sólo favorece la pérdida de hábitat y biodiversidad, sino además la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), particularmente el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que favorece el calentamiento global (Whelan, 1995, Flores y Gómez, 2009, Csiszar *et al.*, 2009). Las afectaciones por las emisiones de GEI se expresan a nivel local, regional y global, por lo que se convierte en un tema de relevancia nacional e internacional. En este contexto, en México instituciones académicas y gubernamentales han estimado las emisiones por incendios forestales en forma localizada espacial y temporalmente. Por ejemplo, el Gobierno del Estado de México (2009) reportó un promedio anual de 0,08 Tg por año de GEI, para dicha entidad. Rodríguez *et al.* (2007) estimaron 6 Tg de GEI para México en el año 2003. El primer trabajo que reporta emisiones de CO<sub>2</sub> para un periodo amplio (1999-2010) y a nivel nacional es Bautista *et al.* (2014) con un total de 112 Tg en el periodo, y un promedio anual de 9,3 Tg. En el contexto regional y global Van der Werf *et al.* (2010) reportan para Centroamérica un promedio de 20 Tg de emisiones, que representan el 1 % de la estimación global en el periodo de 1997-2009.

El modelo más utilizado para estimar las emisiones de GEI es el propuesto por Seiler y Crutzen en 1980, mismo que considera cuatro parámetros principales: total de área quemada, cantidad de biomasa existente, eficiencia del quemado y factor de emisión. El modelo ha sido adaptado por diferentes autores que usan datos satelitales a nivel regional y global, como las propuestas desarrolladas por Wiedinmyer *et al.* (2006) para Norte América y Van der Werf *et al.* (2010) en forma global. No obstante, uno de los parámetros con mayor dificultad del modelo, es la eficiencia del quemado. Como una alternativa, Wooster *et al.* (2005) y Schroeder *et al.* (2014), proponen usar el componente radiante de la energía liberada por un incendio, denominado FRP (*Fire Radiative Power*), derivado de sensores remotos, para calcular la biomasa consumida por el fuego. Con todo, comentan que el método tiene una limitación fuerte cuando se aplica con imágenes de satélite de órbita polar, que es la falta de observaciones para calcular el FRE (*Fire Radiative Energy*). Mientras que con los datos de órbita geostacionaria la limitante se refiere a la resolución espacial baja o gruesa. El 19 de noviembre de 2016 se puso en órbita el satélite GOES-16, que dentro de sus características es mejorar la resolución espacial en las bandas destinadas para la detección del fuego, de esta manera se espera tener mayor observación de los incendios, pero aún hay que esperar para su funcionamiento operativo.

Actualmente en México, como en el mundo, la disponibilidad de la información sobre las emisiones de GEI por la quema de biomasa es un tema de relevancia y de extrema necesidad. El conocimiento sobre su distribución espacial y temporal es fundamental para establecer medidas de mitigación en el marco de cambio global, y reducir sus dimensiones y afectaciones en el sector ambiental y social. Los esfuerzos para el conocimiento de este tema se han iniciado. Sin embargo, y como en todo modelo la propuesta de Seiler y Crutzen aplicada hasta el momento, es factible de mejorar, principalmente en la estimación de los parámetros involucrados. Como anteriormente se comentó, la eficiencia del quemado es uno de los parámetros con mayor incertidumbre. Tradicionalmente en este tema son utilizadas tablas con valores generalizados por tipos de vegetación. Sin considerar las condiciones ambientales prevalecientes en la fecha de la ocurrencia de los incendios. Por ejemplo, la Comisión Nacional

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

Forestal (CONAFOR) (2014) hace diferencia entre los tipos de vegetación para asignar el valor de la EQ, mientras en el artículo publicado más recientemente sobre el tema para México, por Bautista *et al.* (2014), los autores utilizan un valor para todos los tipos de bosque.

Los datos de OT como las imágenes de satélite son de gran utilidad para el seguimiento de diferentes procesos naturales o antrópicos. Diversos autores como Chuvieco y Justice (2008), han comentado las ventajas por su disponibilidad, capacidad de observación de grandes extensiones y la generación de parámetros bio y geofísicos. En este sentido, usarlos en el cálculo de la EQ ayudará a reducir la incertidumbre y a realizar su estimación en forma periódica y uniforme.

El objetivo del presente trabajo es proponer una alternativa para estimar la EQ con base en productos de imágenes satélites, datos medidos en campo y herramientas de minería de datos como el algoritmo *Random Forest*. De esta manera se desarrolla un acercamiento espacial y temporal del fenómeno a estimar, que contribuya a mejorar las estimaciones de los GEI.

## 2. Emisión de gases de efecto invernadero (GEI) por incendios forestales.

Los gases de efecto invernadero (GEI) tienen la propiedad de absorber la energía reflejada o emitida por la superficie de la Tierra. Estos gases forman parte de la atmósfera cuya función principal es regular la temperatura en la superficie, manteniéndola a +15 °C (Ali, 2013; Magaña, 2004; Garduño, 2004). Los gases con esta característica son: el vapor de agua (H<sub>2</sub>O) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), además de los denominados traza, como el metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) (Wigley *et al.*, 1997; Garduño, 2004).

En un incendio forestal ocurren reacciones químicas por la quema de la biomasa y se libera la energía en forma de luz y calor, así como vapor de agua, cenizas y otros productos químicos, que al combinarse con el oxígeno forman el CO<sub>2</sub> (Whelan, 1995; Rodríguez *et al.*, 2002; Torero, 2013). El calor liberado durante la combustión se relaciona con la energía producida por la quema del combustible. Sin embargo, la energía se reduce por varios factores, como la quema incompleta de la vegetación (Whelan, 1995). Que depende del tipo y características de los combustibles, las condiciones meteorológicas y la topografía (Sandberg *et al.*, 2002). Los GEI emitidos por incendios forestales son el CO<sub>2</sub>, el CH<sub>2</sub> y el N<sub>2</sub>O. También se generan el monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), así como componentes orgánicos volátiles y semi-volátiles, partículas suspendidas, amonio (NH<sub>3</sub>), dióxido de sulfuro (SO<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>), hidrocarburos (NMHC) (Wiedinmyer *et al.*, 2006).

En México como en otros países, el fuego se usa en actividades agropecuarias, por tal motivo se establece el concepto de incendio forestal, definido como un fuego sin control, que se propaga libremente y afecta a selvas, bosques y vegetación de zonas áridas y semiáridas (CONAFOR *et al.*, 2012). En este trabajo se usa este concepto, sin considerar las quemadas agropecuarias.

### 2.1. Estimación de emisiones de GEI

El modelo más usado para estimar las emisiones de los GEI es el propuesto por Seiler y Crutzen en 1980, quienes establecen que la cantidad de biomasa quemada en un bioma y las

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

emisiones que genera está dada por la ecuación 1, citada por Palacios *et al.* (2004) y Chuvieco (2008a).

$$E_{ij,k} = B_{ij,m} \times EQ_{ij,m} \times AQ_{ij} \times FE_k \times 10^{-15} \quad (1)$$

siendo:  $E_{ij,k}$  = cantidad de gas  $k$  liberado en un área específica (coordenadas  $i, j$ ) en teragramos,  $B_{ij,m}$  = biomasa (materia seca) de un combustible homogéneo o tipo de vegetación  $m$  de la misma área ( $\text{g}/\text{m}^2$ ),  $EQ_{ij,m}$  = eficiencia del quemado del combustible o tipo de vegetación  $m$  (0 – 1 sin dimensión),  $AQ_{ij}$  = área quemada en  $\text{m}^2$ ,  $FE_k$  = factor de emisión del gas  $k$  ( $\text{g}/\text{kg}$  de materia seca).

Diversos autores han propuesto algunas alternativas para estimar cada uno de los parámetros de la ecuación 1. El tema que nos ocupa en el presente trabajo es la EQ. Este parámetro es fundamental porque el contenido de carbono en el combustible influye en la cantidad de gases liberados a la atmósfera cuando la biomasa se quema (Lima de Alencastro *et al.*, 1999).

## 2.2. Eficiencia del quemado

En la literatura de habla inglesa este parámetro es identificado de varias formas: *combustion completeness*, *burning efficiency*, *combustion efficiency* o *combustion factor*, con definiciones semejantes; en algunos casos hacen referencia a la fracción del combustible o biomasa consumida por el fuego en un área (Seiler y Crutzen, 1980; Lima de Alencastro *et al.*, 1999, Hély *et al.*, 2002) o lo definen como el porcentaje o fracción del carbono liberado del contenido original en la biomasa antes de quemarse (Fearnside *et al.*, 2001). En el presente trabajo se considera a la EQ como la fracción de la biomasa o combustible consumido por el fuego en un área determinada. En este marco es necesario establecer el cambio de biomasa o combustible antes y después de la presencia del fuego, como lo mencionan Roy & Landmann (2005), quienes aplican la ecuación 2 para el cálculo.

$$EQ = b_{t1} - b_{t2} / b_{t1} \quad (2)$$

Siendo  $EQ$  = Eficiencia del quemado,  $b_{t1}$  = Carga de combustible antes del fuego,  $b_{t2}$  = Carga de combustible después del fuego.

Diversos autores como Whelan (1995), Fearnside *et al.* (2001) y Roberts *et al.* (2009) han citado los principales elementos ambientales que influyen en las condiciones del combustible, y que condicionan la EQ; entre ellos se mencionan los siguientes: a) tipo y cantidad de combustible. Asociado al tipo de vegetación predominante y a las dimensiones en cuanto peso y tamaño. En general se ha observado que, entre menor dimensión del combustible, mayor eficiencia del quemado y viceversa. b) Humedad del combustible. Cuando el combustible tiene mayor humedad presentará menor EQ. La humedad depende de las condiciones atmosféricas predominantes, regidas principalmente por la temperatura y la humedad relativa en la atmósfera, así como la dirección y la velocidad del viento. c) Topografía. La configuración del terreno influye en la distribución espacial de los combustibles, así como en la cantidad de la energía del Sol que reciben durante el día y el año.

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

### 2.3. Alternativas para estimar la eficiencia del quemado (EQ)

Para estimar la EQ existen diversos métodos que se pueden dividir en dos: aquellos que miden en campo el combustible consumido y aquellos que emplean datos satelitales con información de campo como referencia. Ambos caminos tienen un común denominador, establecer el cambio en la biomasa o combustible antes y después del incendio. El primer grupo corresponde a las técnicas de mediciones en campo, con base en diversas unidades de muestreo y el segundo considera los cambios espectrales por la quema de biomasa.

En las últimas décadas la disponibilidad de los datos de sensores remotos ha ido en aumento. Basta con hacer una revisión en los programas de OT para identificar la diversidad de datos y productos desarrollados y disponibles al público. En este marco diversos autores, entre ellos Wiedinmyer *et al.* (2006), Anaya (2009) y Van der Werf *et al.* (2010) emplearon la ecuación 1 para estimar las emisiones de los GEI, para ello usaron productos satelitales y cartográficos en el cálculo de los parámetros de la ecuación, exceptuando el factor de emisión que lo obtuvieron de la literatura.

Wiedinmyer *et al.* (2006) estimaron la EQ en función de la cobertura forestal en cada píxel registrado como fuego activo, establecieron el porcentaje de cobertura de las clases herbáceo y arbolado con el producto denominado campos continuos de vegetación (VCF por sus siglas en inglés *Vegetation Continuous Fields*). A la primera clase le asignaron el valor 0,98 de EQ, en el caso de la segunda establecieron dos alternativas: si la cobertura del arbolado es entre 40 % y 60 % consideran a la EQ de 0,30, si la cobertura es mayor al 60 % consideran una EQ del 0,30 en arbolado y 0,90 en herbáceo. Anaya (2009) estimó la EQ en función de la diferencia del índice de vegetación mejorado (EVI por sus siglas en inglés *Enhanced Vegetation Index*), antes y después de la presencia del fuego, consideró que diferencias negativas grandes corresponden a la señal de vegetación quemada, mientras los valores en áreas no quemadas son cercanos a cero o positivos. Van der Werf *et al.* (2010) usan la persistencia de un fuego activo (número de veces que se reporta un píxel en esta categoría) y las áreas quemadas categorizadas en herbáceo y arbolado, establecen la EQ en valores mínimos y máximos por tipo de combustible, basados en el contenido de humedad de las plantas y del suelo. Oliva (2013) ajustó los valores de la EQ, expresados en la literatura, con los resultados de la severidad del incendio, clasificada en tres categorías baja, media y severa, obtenidas a partir de una clasificación supervisada con el método *Spectral Angle Mapper*; en el ajuste consideró los niveles de quemado y consumo de tres estratos: suelo, matorral y arbolado. Barbosa *et al.* (1999) y Palacios *et al.* (2004) emplearon el índice relativo de verdor (RGI por sus siglas en inglés *Relative Greenness Index*) y aplicaron la ecuación 2, para considerar las variaciones temporales de la biomasa. El resultado del RGI lo multiplican con valores de EQ estimados en campo por tipo de ecosistema.

Wooster *et al.* (2005) proponen usar la energía del fuego (FRE), que corresponde a la integración del FRP. En el desarrollo del método usaron diferentes sensores como un espectro radiómetro para realizar mediciones en campo e imágenes *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) y *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Identificaron una relación lineal entre el FRE y el total del combustible consumido. Los autores concluyeron que no hay una evidencia que la biomasa consumida dependa del tipo de vegetación. Establecieron que, si es posible calcular el FRE a partir de la integración temporal del FRP, y aún sin conocer los tipos de combustibles, sería posible estimar el combustible consumido. Sin embargo, existen limitaciones, como se comentó en la introducción.

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

En este apartado se abordaron los temas de las emisiones de GEI y del fuego, se enfocó a sus manifestaciones y comportamiento, se hizo énfasis en el tema de la EQ para entender el fenómeno a estudiar, y se mencionó algunos de los métodos utilizados para su estimación. En los siguientes apartados se presenta el método propuesto.

### 3. Materiales, datos y métodos

La estimación de la EQ se enfoca en los ecosistemas forestales de México, por lo tanto, en los siguientes apartados se describirá la definición del área de estudio, así como las variables e indicadores para aplicar el método de minería de datos, en específico el algoritmo árboles de decisión *Random Forest* en su modo de regresión.

#### 3.1. Definición del área de estudio

El área de estudio se determinó con base en la ecorregión, definida como un espacio geográfico relativamente homogéneo y ecológicamente distinto a otro, y se identifica por criterios ambientales, donde se establecen comunidades bióticas (flora, fauna y ecosistemas característicos), ubicadas en rasgos geológicos, topográficos, geomorfológicos, edafológicos e hídricos comunes, con la influencia de un determinado clima (Challenger y Soberón, 2008; Bocco *et al.*, 2009).

El área de estudio se localiza en América del Norte, en el sudeste y sudoeste de México, entre los 22° y 15° 30' de latitud norte y los 86° 30' y 105° 45' de longitud oeste (véase figura 1). El trabajo se centra en tres ecorregiones forestales de México, porque en ellas se encuentran diferentes tipos de vegetación donde la presencia del fuego es constante y con respuestas ecológicas diferentes. Los criterios para definir el área de estudio se enfocaron a seleccionar un área representativa de los siguientes biomas de México: Sierras templadas, Selvas cálida-secas y Selvas cálida-húmedas) y que presentaran mayor presión de incendios forestales. Este criterio fue evaluado con datos de la superficie afectada en áreas forestales por estado, desde 1970 a 2013, con base en los datos estadísticos de la CONAFOR; así como la densidad de fuegos activos por ecorregión, detectados con imágenes de satélite *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) y MODIS (2000 a 2013), información proveniente del Sistema de Alerta Temprana de Incendios Forestales para México, operado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

Las tres ecorregiones que cumplieron con los criterios establecidos fueron: 13.5 Sierra Madre del Sur que pertenece a las Sierras templadas, se extiende desde el estado de Jalisco hasta Oaxaca, donde predominan los bosques templados. 14.5 Planicie Costera y lomeríos del Pacífico sur, perteneciente a Selvas cálida-secas, al igual que la anterior va desde Jalisco hasta Oaxaca, paralela a la costa, en esta zona predomina el bosque tropical caducifolio, y 15.2 Planicies y lomeríos de la península de Yucatán, perteneciente a la ecorregión Selvas cálida-húmedas, cubre el estado de Quintana Roo y parte de los estados de Yucatán y Campeche, donde se encuentra el bosque tropical lluvioso.

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>



**Figura 1. Área de estudio en México**

### 3.2. Selección y preparación de datos

#### 3.2.1. Variables e indicadores para estimar la eficiencia del quemado

Conforme a las ideas expresadas en los apartados anteriores y los estudios revisados se identificaron tres variables principales: el combustible, las condiciones meteorológicas y la topografía. Para cada variable se establecieron indicadores de interés para el análisis. Por lo que la propuesta para estimar la EQ se basa en el uso de productos satelitales, principalmente para evaluar el cambio en la vegetación como resultado de la acción del fuego y datos de consumo del combustible medidos en campo.

#### A) Combustible

Para la variable combustible fueron seleccionados cuatro indicadores, tres corresponden a productos generados con datos del sensor MODIS, y uno con datos Landsat y ALOS PALSAR, que a continuación se describen:

Verdor de la vegetación. Resultado de aplicar índices espectrales como el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) y el EVI. Se considera el verdor como una respuesta a las condiciones de humedad en el combustible vivo y a la actividad fotosintética. El producto

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

---

satelital utilizado corresponde a una serie de tiempo de los índices de vegetación de compuestos 16 días de 250 m, generada con el método de *Time Series Generator* (TiSeg) Colditz (*et al.*, 2008).

Campos continuos de vegetación (VCF *Vegetation Continuous Field*). Este indicador especifica el porcentaje de cobertura del suelo en un píxel de 250 m, con tres capas: porcentaje de suelo sin vegetación, porcentaje de vegetación no arbórea y porcentaje de vegetación arbórea (Townshend *et al.*, 2011). El indicador ayudará a diferenciar el elemento de cantidad de combustible en dos categorías: ligero (no arbóreo) y pesado (arbóreo).

Cobertura del suelo. Indica el tipo de elemento que cubre el suelo, puede ser natural (vegetación) o antrópico (Chuvienco, 2008b). El producto a utilizar fue generado con imágenes MODIS de 250 m de resolución, en el marco del Sistema de Monitoreo del Cambio en la Cobertura de Suelo de América del Norte (NALCMS por sus siglas en inglés) (Colditz *et al.*, 2012).

Biomasa. Se utilizó el mapa producido por Alianza - MREDD+ en 2013, elaborado con datos de campo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos, el producto densidad del dosel (elaborado con imágenes Landsat) e imágenes ALOS PALSAR.

#### B) *Condiciones meteorológicas*

Para cubrir esta variable se utilizó el modelo de humedad del combustible muerto, que genera la CONABIO como parte del Sistema de alerta temprana de incendios forestales. El modelo estima la humedad del combustible muerto de 100 h diariamente. Los insumos de entrada son imágenes TRMM para estimar la duración de la precipitación, y el producto MYD07 de imágenes MODIS, que corresponde al perfil atmosférico. De este producto se extrae la temperatura a nivel de superficie, utilizando un modelo digital de elevación, la temperatura del aire a partir de la columna de temperatura y el valor del punto de rocío de la columna de humedad, ambos datos se utilizan para calcular la humedad relativa. Posteriormente se aplican las ecuaciones de peligro de incendios de los Estados Unidos de América (*National Fire Danger Rating System* (NFDRS)) para estimar la humedad del combustible muerto (Cervera, 2009). El producto final presenta el porcentaje de humedad en el combustible muerto de 100 h, para cada día, con resolución espacial de 28 km. Este modelo evalúa la influencia de las variables meteorológicas como la humedad y la temperatura sobre el combustible y, por lo tanto, en el comportamiento del fuego. La CONABIO genera un modelo por día y lo publica a las 8:00 de la mañana diariamente.

#### C) *Topografía*

Esta variable se encuentra integrada por cuatro indicadores: altitud, pendiente, orientación e iluminación, con tamaño de celda de 250 m. Los productos fueron generados a partir un modelo digital de elevación de 120 m, elaborado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

### 3.2.2. Datos de campo sobre el consumo del combustible

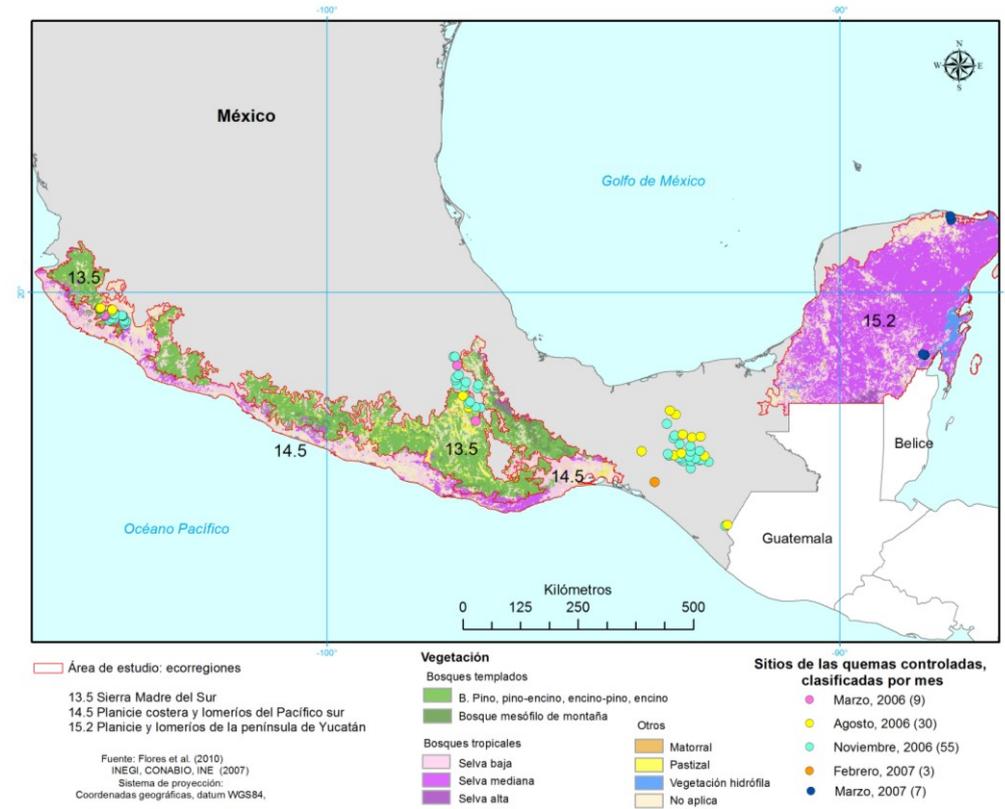
Los datos de campo fueron proporcionados por el Dr. German Flores Garnica, investigador del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Generados en diversas campañas de quemas controladas con el objetivo de evaluar el comportamiento del fuego. Las campañas se realizaron principalmente durante el año 2006, no obstante, algunos datos corresponden al último trimestre de 2005 y del primer trimestre del 2007. Las quemas se realizaron en parcelas tipo con las siguientes características, un rectángulo de 100 x 200 m (20 000 m<sup>2</sup>), el cual fue subdividido en tres cuadrantes de 50 x 50 m, en el centro de cada una establecieron un círculo de 13,82 m de radio para cubrir 600 m<sup>2</sup>, donde se realizó el inventario dasométrico. El consumo del combustible lo midieron en 17 cuadros de 30 por 30 cm, mediante una varilla de acero (Flores *et al.*, 2010).

Los datos de campo constan de 246 coordenadas correspondientes al mismo número de parcelas tipo, distribuidas en 15 estados de México. Cada par de coordenadas cuenta con datos de estado, tipo de vegetación, carga del combustible antes y después de la quema en ton/ha y el cálculo del consumo. A partir de las coordenadas proporcionadas se generó un archivo espacial para revisar su localización y distribución. Debido a su ubicación, en el área de estudio se localizan sólo 48 sitios. Sin embargo, se identificaron 70 sitios en ambientes semejantes y más cercanos al área de estudio. Por lo que, y con base en la primera ley de la geografía que establece "todo está relacionado a todo, pero las cosas cercanas están más relacionadas que las distantes" (Tobler, 1979:234) se incluyeron en el análisis. De esta manera se integró un conjunto de 118 sitios. Algunos sitios no presentaban el dato de vegetación o sólo indicaban la cobertura, por ejemplo "bosque", sin especificar el tipo. Por consiguiente, se usó el mapa de uso del suelo y vegetación serie IV, escala 1:250 000, generado por el INEGI, para complementar el dato de campo faltante. De estos 118 sitios fueron eliminados 14 por las siguientes razones: falta de datos de consumo para ocho sitios, falta de fecha para cinco, y uno más por incongruencia en el dato de consumo del combustible. Como resultado de la limpieza de datos se conservaron 104 sitios para el análisis, la distribución de los sitios en el área de estudio se presenta en la figura 2.

La distribución temporal de los sitios es de la siguiente manera: el 8 % de las quemas se realizaron en el mes de marzo de 2006, el 29 % en agosto, y el 53 % en noviembre, esto significa que el 90 % de las quemas fueron programadas en el año 2006. El 10 % restante ocurrieron en el primer trimestre del año 2007, siendo el 3 % en febrero y el 7 % en marzo. Es importante considerar que el periodo del año con mayor presencia de incendios en México es de marzo a mayo, debido a los regímenes de la precipitación prevaleciente en el territorio.

En cuanto la distribución de los sitios en los tipos de vegetación, existe un predominio en selva baja con 24 % y bosque de encino con el 23 %, en tercer lugar se ubican los pastizales con el 18 %; posteriormente se ubica la selva mediana, bosque de pino y bosque de pino-encino con 6 % cada uno, mientras el bosque de encino-pino, el matorral y agricultura representan el 4 % cada uno, finalmente el bosque mesófilo de montaña, matorral de desértico y selva alta presentan los porcentajes menores 2 %, 2 % y 1 % respectivamente.

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>



**Figura 2. Sitios de quemas controladas seleccionados**

### 3.2.3. Integración del cubo de datos y caracterización de los sitios

Los productos mencionados en el apartado anterior pasaron por los siguientes procesos para la construcción de un cubo de datos en el programa *RStudio*:

- Re-proyección a cónica conforme de Lambert. Esta proyección es la recomendada por el INEGI, para representa a la república mexicana.
- Unificación de resolución a 250 m, con excepción del modelo de humedad.
- Recorte del área de interés. Con dos objetivos: concentrarse en los ambientes de interés y reducir el tamaño de datos a procesar.
- Construcción del cubo de datos. Se integraron 94 capas, correspondientes a los productos antes mencionados y otros más, de la siguiente manera: una capa de biomasa (Alianza MREDD+, 2013), nueve capas correspondientes al VCF (tres por año, cobertura de vegetación arbórea, cobertura de vegetación no arbórea y sin vegetación) de los años 2005, 2006 y 2007, dos capas de cobertura del suelo (años 2005 y 2010), cuatro capas de topografía (altitud, pendiente, orientación e iluminación sur), 25 compuestos de 16 días de los índices de vegetación (EVI y NDVI) considerando dos compuestos antes y dos compuestos después de la fecha de la quema, y 53 modelos de humedad de combustible muerto (generados por la CONABIO, ver el apartado Condiciones meteorológicas), organizados de la siguiente manera: el modelo de humedad para la fecha correspondiente, el modelo del día anterior y el modelo del día posterior.

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

Los sitios de las quemas fueron caracterizados espacialmente con el cubo de datos. Para el caso de los índices de vegetación la caracterización fue espacial y temporal, porque para cada sitio fueron seleccionados tres compuestos de la siguiente manera: a) compuesto correspondiente, es aquel que comprende la fecha de la ocurrencia de la quema. Por ejemplo, al sitio con identificador 230, localizado en el estado de Jalisco y con fecha 13 de marzo de 2006, le corresponde el compuesto 2006065 (año 2006, día juliano 065 = 6 de marzo). b) Compuesto inmediato anterior, justo el compuesto anterior al compuesto correspondiente, siguiendo el ejemplo, se asigna el compuesto 2006049 (18 de febrero de 2006). c) Compuesto inmediato posterior, el compuesto inmediato posterior de la ocurrencia del fuego, en el ejemplo 2006081 (22 de marzo de 2006). De esta manera se reduce el riesgo de no captar el área quemada. Porque en el proceso de integración de los compuestos de índices de vegetación son seleccionados los píxeles por dos caminos principales: el máximo valor del compuesto o el ángulo de observación más pequeño (Solano *et al.*, 2010). Por lo tanto, puede ser elegido un píxel con fecha anterior a la quema y no reflejar el cambio en el índice.

Una vez caracterizados los sitios se calculó la diferencia relativa de los índices de vegetación con la ecuación 2, sustituyendo la biomasa por el índice de vegetación del compuesto antes y después de la presencia del fuego. Con el objetivo de probar diferentes alternativas de cambio se realizaron cuatro diferencias relativas como se comentan a continuación: a) para el EVI considerando un compuesto antes y uno después del compuesto de la quema, b) para el EVI considerando el compuesto correspondiente de la quema y un compuesto después, c) para el NDVI considerando un compuesto antes y uno después del compuesto de la quema y d) para el NDVI considerando el compuesto correspondiente de la quema y un compuesto después. Por otra parte, y con la finalidad de evaluar el cambio en la humedad del combustible, también se realizó la diferencia de la humedad del día correspondiente a la fecha y el día anterior.

### 3.3. Modelo para estimar la eficiencia de quemado

Se propone emplear métodos de minería de datos para buscar patrones en los datos y predecir la EQ. Se eligió la técnica árboles de decisión que ha sido utilizada para generar productos a partir de datos satelitales con resultados adecuados, por lo que, se considera una herramienta robusta para estos temas (Hansen *et al.*, 2002). El método puede ser aplicado para valores cuantitativos como el caso del producto VCF o cualitativos como en el tema de cobertura del suelo.

#### 3.3.1. Árboles de decisión *Random Forest*

Un árbol de decisión es un modelo de probabilidad para predecir un resultado a partir de observaciones, con base en un conjunto de condiciones (reglas de separación) organizadas en forma jerárquica (de arriba hacia abajo), para establecer regiones no superpuestas en el espacio predictor, identificadas como nodos terminales (James *et al.*, 2013). En específico, se aplicó la propuesta de *Random Forest* en su modo de regresión. La idea es construir un gran número de árboles de decisión y tratar de combinarlos, a este proceso se le conoce como ensamble, en el marco del aprendizaje de máquina (Breiman, 2001).

El algoritmo *Random Forests* es una técnica dentro de los árboles de decisión diseñado para reducir la varianza en el modelo y evitar el sobreajuste, toma como base la propuesta del

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

algoritmo *bagging*, que consiste en generar diferentes árboles con los mismos datos, pero para cada árbol toma una muestra aleatoria diferente, para ello utiliza el método *bootstrap* bajo la premisa que el promediar un conjunto de observaciones diferentes se reduce la varianza (James *et al.*, 2013). La propuesta de *Random Forest* consiste en realizar un muestro aleatorio diferente de  $m$  variables del conjunto total de  $p$  variables para cada división, y seleccionar sólo la mejor variable para la división. De esta manera el algoritmo evita, en lo posible, repetir la misma variable como inicio, en caso que tuviera fuerte influencia, como sucedería en el algoritmo de *bagging*. El resultado final es el promedio de todos los árboles generados, de manera que, el resultado es menos variable y más confiable (Breiman s/f, James, *et al.*, 2013). En el proceso se realizan pruebas de error internas, cada árbol se construye con un muestreo diferente de los datos originales, se deja 1/3 de datos sin participar en el proceso para ser utilizados en las pruebas de error, mediante el método *out-of-bag*, compara el valor estimado con el observado (Breiman s/f).

### 3.3.2. Definición del modelo

El producto final de la caracterización de las coordenadas de las quemadas controladas con el cubo de datos es un "marco de datos" de *RStudio*. El marco de datos tiene 104 registros con 37 indicadores (anexo 1), incluyendo el valor de la diferencia relativa del consumo (DRC) o eficiencia del quemado (EQ), que corresponde a la variable dependiente a evaluar, y cuatro datos complementarios (datos de referencia de las quemadas). Es menester mencionar que antes de correr el modelo es necesario transformar los indicadores categóricos como el tipo de vegetación y cobertura del suelo a factores, para evitar evaluarlos como variable continuas.

Al marco de datos se le aplicaron los siguientes criterios de selección: a) sitios que reportan en el modelo de humedad valores mayores a cero, porque este valor indica que no hubo suficientes datos para estimar la humedad, y b) sitios que en la diferencia relativa de EVI o en la diferencia relativa de NDVI tuvieron valores positivos, porque dichos valores indican reducción de los índices de vegetación en la fecha posterior a la presencia del fuego, mientras los valores negativos indican un aumento. Situación que no se espera después del evento de la quema, pero puede suceder debido a las siguientes causas: como el área de la parcela corresponde al 32 % de un píxel de 250 m la influencia del fuego no es lo suficiente para que el píxel registre el cambio, o por la regeneración rápida de la vegetación, o porque la calidad del píxel es baja en los compuestos de los índices de vegetación, por consiguiente, el valor se calculó mediante la interpolación en la serie de tiempo. De esta manera de los 104 sitios fueron seleccionados 74.

Una vez seleccionados los sitios fue preciso establecer los indicadores que participarían en el modelo de *Random Forest*. Como punto de partida se consideró utilizar todos los indicadores, sin embargo, fue necesario alternar el uso de las cuatro diferencias de los índices de vegetación, de esta manera se aplicaron varios modelos que fueron evaluados con la correlación de los valores predichos y observados ( $r$ ) y el promedio absoluto del error. De estas primeras pruebas se determinó que la diferencia relativa de EVI antes - después ( $DRE_{a-d}$ ) arrojó las mejores correlaciones de las cuatro diferencias de los índices de vegetación. Posteriormente, el modelo se ajustó con múltiples combinaciones de los indicadores, con base en su importancia teórica y la importancia o porcentaje de participación de cada indicador (estimado por el modelo). Los resultados fueron evaluados con las mismas pruebas mencionadas, además de la media de los residuos al cuadrado (*MSR Mean of squared residual*) estimada por el modelo. A partir de estas pruebas se vislumbró que las variables de combustible y meteorología tienen

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

mayor influencia en la EQ que la variable topografía, no obstante, ésta es de gran importancia en la propagación del fuego como lo menciona la CONAFOR *et al.* (2012).

Como un elemento más en la evaluación de los resultados se establecieron los intervalos de predicción para cada sitio. En una distribución normal, en términos generales, el 68 % de los datos se encuentran a  $\pm 1$  desviación estándar de la media, y el 95 % en  $\pm 2$  desviaciones estándar. Asumiendo una distribución normal, se estimaron los límites inferior y superior para cada sitio, para establecer el intervalo de predicción, con la función *quantregForest* en *RStudio*.

También se realizó un análisis por tipo de vegetación con el objetivo de identificar posibles valores discordantes o desviados, considerados como aquellas observaciones que parecen inconsistentes y presentan un comportamiento extremo diferente. Sin embargo, es necesario considerar que puede ser un valor atípico, por lo tanto, se puso énfasis en la respuesta de la diferencia del EVI. De esta manera se identificaron puntos a excluir del análisis. El primer sitio excluido fue el localizado en agricultura, porque el tema que nos ocupa corresponde a las áreas forestales. En este ejercicio se identificó que los valores más altos de DRC ( $> 0.79$ ) y localizados en el tipo de vegetación de pastizal y matorral, registraban valores muy bajos en el DRE, esta situación se presentó en cuatro sitios. Además, se identificaron dos sitios que tenían un comportamiento discordante en los resultados de diferentes modelos aplicados, ambos localizados en el tipo de vegetación de selva baja.

### 3.3.3. Aplicación del modelo

Una vez definido el modelo y considerando que el algoritmo *Random Forest* realiza una validación cruzada interna, se procedió a la aplicación del modelo para estimar la eficiencia del quemado en las áreas identificadas como quemadas en todo el mes de marzo de 2006, se eligió dicho mes porque es uno de los meses de la temporada seca del año en México. Para ello se utilizó el producto de área quemada MCD64A1 versión 5.1, algoritmo desarrollado y explicado por Giglio *et al.* (2006) y Giglio *et al.* (2009). Debido a que los datos de entrada del modelo se encuentran en el formato de puntos que corresponden a las coordenadas de los sitios de las quemas controladas, se tomó como referencia las coordenadas del centro de cada píxel identificado como quemado.

El producto MCD64A1 se encuentra disponible en el formato de tiles con proyección Sinusoidal, para el caso de México son necesarios nueve tiles, los datos se obtuvieron de un servidor FTP (*File Transfer Protocol*) y pasaron por el siguiente procedimiento: a) unión de tiles para generar un mosaico para el mes de marzo de 2006, b) extracción de las coordenadas centrales de cada píxel, c) selección de las coordenadas de los píxeles identificados como quemados, d) cambio de proyección a cónica conforme de Lambert, d) selección de los puntos localizados en el área de estudio, e) caracterización de las coordenadas con el mapa de vegetación y uso de suelo serie IV, f) selección de las coordenadas ubicadas en vegetación, g) definición de la fecha calendario a partir del día juliano. En total se trabajaron 453 coordenadas. Las coordenadas se encuentran en formato shapefile como los datos de entrada del modelo, y fueron caracterizadas con el cubo de datos, que fue complementado con los datos necesarios para todo el mes de marzo 2006, se generó el marco de datos dentro del programa *RStudio*.

El marco de datos se utilizó para estimar la eficiencia del quemado utilizando la función *predict* de *RStudio*, considerada como una función genérica que realiza predicciones a partir de los resultados de funciones de ajuste (RStudio Inc., 2014). Los datos de entrada para esta función son el modelo definido con los datos de las quemas controladas que se almacenó en un

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

archivo denominado *modelo.rf* y el marco de datos generado con los puntos correspondientes a las coordenadas centrales de los píxeles identificados como quemados del producto MCD64A1 ver. 5.1. La salida de la función *predict* es un marco de datos con las coordenadas y el valor predicho de la EQ para cada punto, con este resultado se generó un *shapefile* para su manejo espacial.

#### 4. Resultados.

Los resultados se presentan en dos secciones, la primera corresponde a la definición del modelo y la segunda a su aplicación en las áreas identificadas como quemadas en el mes de marzo de 2006.

##### 4.1 Definición del modelo

El modelo final se estableció con el análisis de 67 sitios, aplicando 1000 árboles. Los indicadores que arrojaron mejores resultados fueron ocho: biomasa, porcentaje del suelo sin vegetación, porcentaje de cobertura del suelo con vegetación no arbórea y porcentaje de cobertura del suelo con vegetación arbórea (VCF 2006), cobertura del suelo 2005, DREa-d, modelo de humedad de combustible 100 h y tipo de vegetación (dato proveniente de campo).

La importancia de los indicadores en el modelo seleccionado se refiere a cuánto crece el error al intercambiar aleatoriamente todos los casos de los datos que no fueron considerados en el muestreo de *bootstrap*. Por lo tanto, no son utilizados en la creación del árbol, y se calcula nuevamente el error. Al final del modelo la cantidad que el nuevo error excede del error original se considera como la importancia (Breiman, s/f). Para el modelo definido, el indicador con mayor influencia es el tipo de vegetación, con una participación del 26,9 %, esto es fácil de entender porque el indicador proviene de la información de campo, mientras el resto de los indicadores son de datos satelitales. Dos ocupan el segundo lugar, que corresponden a la cobertura del suelo 17,1 % y a la biomasa 17,0 %. La importancia de los siguientes indicadores disminuye drásticamente. El VCF vegetación arbórea con el 7,5 % y la humedad en el combustible muerto de 100 h con el 5,8 %, este indicador es el más dinámico porque tienen observaciones diarias y es el dato con menor resolución espacial, se considera posible aplicarlo toda vez que el área representativa de una estación meteorológica automática es de 5 km de radio aproximadamente, con excepción en zonas montañosas (SMN, 2017), mientras la resolución del producto es de 28 km. Los dos indicadores complemento del VCF de vegetación arbórea presentan valores similares (4,8 % y 4,3 %). Cabe destacar que la DREa-d presenta la menor importancia con el 3,5 %. Este último se considera como uno de los indicadores más dinámicos, con variaciones espaciales y temporales continuas, incluso en un mismo tipo de vegetación. Mientras en el otro extremo se encuentra el tipo de vegetación, cobertura del suelo y biomasa, indicadores que son más estables en el tiempo. Por último, el VCF al ser anual se considera como un indicador con variaciones intermedias.

El algoritmo de *Random Forest* proporciona diferentes productos para su interpretación y evaluación como son las métricas de error, correlación (entre el valor estimado y el predicho) A continuación se describen en función de los datos de salida del modelo:

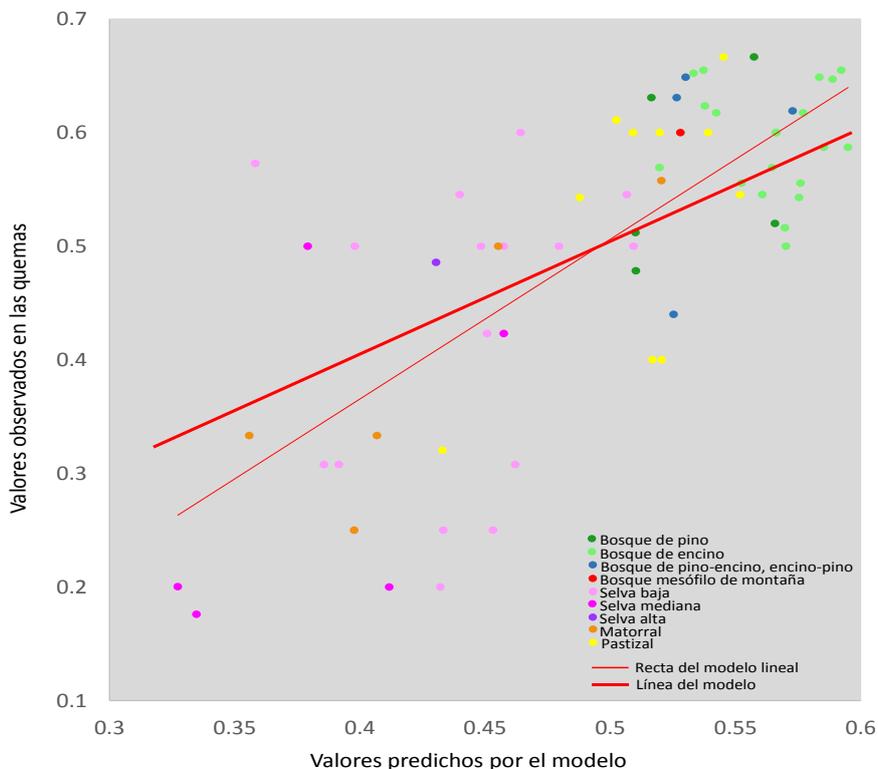
Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

### A) Métricas de error

Como anteriormente se mencionó los algoritmos de árboles de decisión tienen como finalidad reducir el error; por consiguiente, una herramienta útil para evaluar el modelo es observar el comportamiento del error en los árboles de decisión creados. Para el modelo seleccionado en los primeros 10 árboles, el error es elevado ( $> 0.010$ ), decreciendo fuertemente hacia los 30 árboles creados ( $\pm 0.010$ ). A partir de los 150 árboles se inicia la estabilización, hasta alcanzarla en los 600 árboles. El resultado del modelo arroja el valor de 0,0093 como MSR, y el error absoluto promedio es de 0,079, ambos valores se encuentran cercanos a cero. Por otra parte, el modelo explica el 48,97 % de la variación de los datos. Es importante mencionar que la dimensión de la parcela tipo representa el 32 % de la resolución espacial de los productos satelitales usados como indicadores.

### B) Correlación ( $r$ ) entre datos observados y predichos

Se calculó la correlación entre los valores observados en las quemas controladas y los predichos por el modelo, con la finalidad de evaluar el comportamiento de los resultados en forma individual, y conocer cuánto el modelo se acerca a los valores reales, considerando la diferencia entre la dimensión de las parcelas tipo y la resolución espacial de los productos utilizados. La correlación entre los valores observados en las quemas controladas y los valores estimados con el algoritmo es de 0,7320; este valor fue el más alto encontrado en las diferentes pruebas. En la figura 3 se muestra gráficamente la correlación.



**Figura 3. Correlación entre los valores predichos y observados del consumo del combustible en las quemas prescritas.**

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

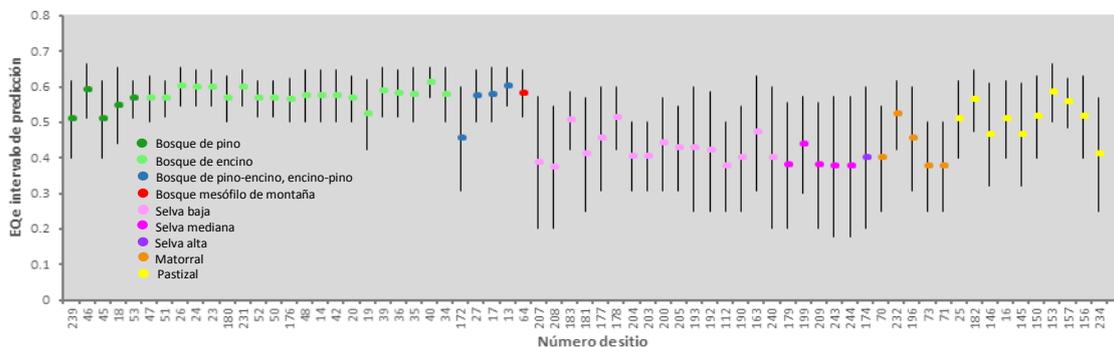
En el diagrama de dispersión se identifica una correlación positiva, pero no perfecta, porque ambos valores aumentan, pero existe una mayor dispersión en los valores bajos. Para el caso de la selva baja existe el mismo valor observado y se presentan diferentes valores predichos. Esta situación se debe a la naturaleza del fenómeno a estudiar, debido a la diversidad de especies en los diferentes ecosistemas. Aunado a esta aseveración la distribución de la nube de puntos muestra una separación entre dos ambientes principales el tropical y el templado. Cabe recordar que el 25 % de las quemadas se realizaron en bosque tropicales (selva baja) y el 23 % en bosque templado de encinos, éste último presenta un comportamiento más uniforme.

Los bosques templados caracterizados por el bosque de encinos (puntos verdes), bosque de pinos (puntos verdes oscuro), bosque de encino-pino y pino-encino (puntos azules) y bosque mesófilo de montaña (punto rojo) presentan los valores predichos y observados más altos, por arriba de 0,5 (la mitad del máximo valor que se puede alcanzar en la EQ). Junto con los pastos (puntos amarillos) que en este caso es un comportamiento esperado, si se considera que los pastos presentan el combustible más ligero y es más factible que la eficiencia del quemado sea más alta y variable, como lo muestran los valores observados.

Los bosques tropicales que corresponden a selvas bajas (puntos rosas), medianas (puntos violetas) y altas (punto morado) presentan valores predichos bajos, pero los observados son más dispersos, desde bajos a medio-alto, esto nos indica mayor inexactitud en la estimación debido a la variación de las condiciones de quemado. Por otra parte, los matorrales tienen un comportamiento semejante al bosque tropical. Como en todo fenómeno natural a estudiar existen transiciones, en este caso corresponde algunos sitios de pastizal que reportaron valores predichos más bajos y bosque mixtos (bosque pino-encino o encino-pino).

### C) Intervalos de predicción

Con el objetivo de evaluar los resultados se calcularon los intervalos de predicción para cada sitio. Los resultados se muestran en la figura 4, ordenados por tipo de vegetación (donde los colores tienen el mismo significado descrito en los apartados anteriores), en el eje X se despliega el identificador de cada uno de los sitios de las quemadas, y en el eje Y el límite superior e inferior del intervalo de predicción, marcados con líneas negras.



**Figura 4. Intervalos de predicción de la EQ por sitio**

El intervalo máximo es de 0,401 que corresponde al sitio 174 localizado en selva alta mientras el mínimo (0,085) le corresponde al número 40 localizado en bosque de encino. La media de la amplitud de la incertidumbre es de 0,217 y el valor más frecuente es el 0,219, valores muy semejantes. No obstante, la mediana es de 0,196, esto nos indica dos situaciones:

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

primero que los intervalos no presentan una distribución normal, y que el 50 % de los sitios presentan incertidumbre menor a la media, resultado adecuado para el tema que se está tratando. Este dato se ve reforzado con el coeficiente de asimetría (0,459) que indica un sesgo hacia los valores bajos. La desviación estándar es de 0,092 y la varianza es de 0,008, valores que sugiere una dispersión baja. Sin embargo, es importante mencionar que casi una quinta parte de los sitios (19,4 %) reportan amplitudes mayores a 0,3 esto significa que el valor estimado puede variar  $\pm 0,15$ .

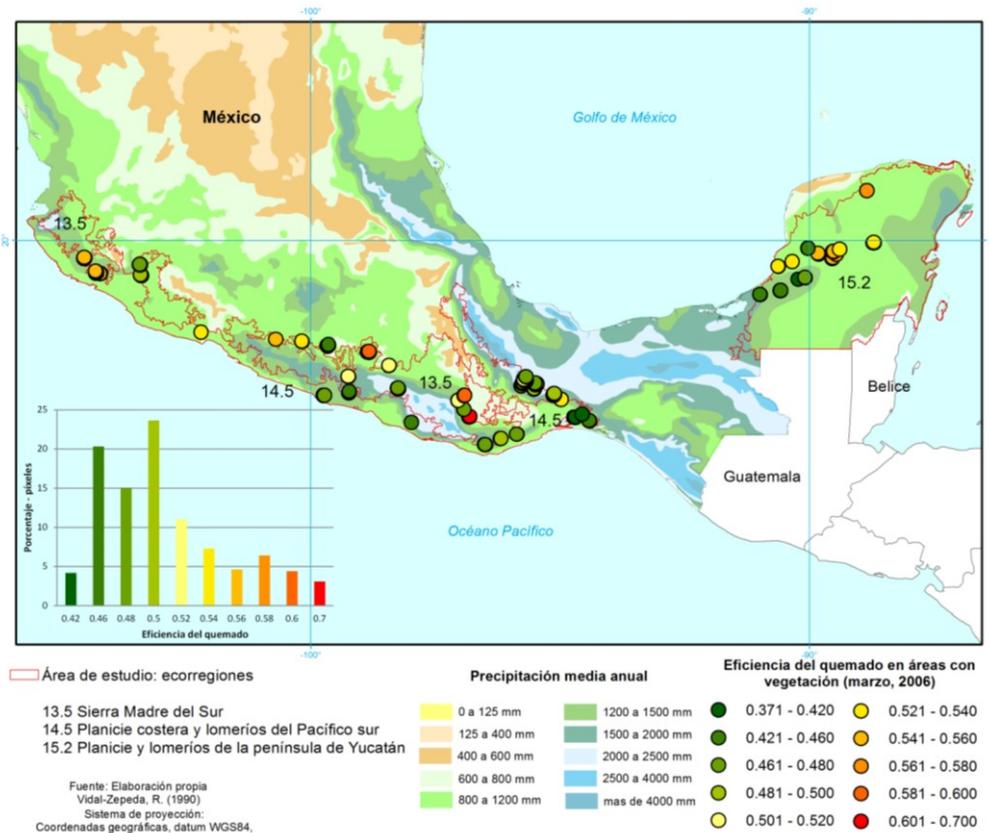
Nuevamente destaca la separación de los ambientes templado y tropical. En términos generales los sitios en el ambiente templado poseen intervalos más pequeños que los tropicales; en una posición intermedia se encuentran los pastizales y los matorrales. Esto como consecuencia de las variaciones en el consumo del combustible registrado en campo en los diferentes tipos de vegetación. En los bosques templados, el intervalo del consumo del combustible entre el valor máximo y mínimo fue de 0,23, mientras en los bosques tropicales fue de 0,42, y el mismo valor se reportó en los pastos y matorrales. Por consiguiente, la estimación de la EQ en los bosques templados presentará menor incertidumbre que los ambientes tropicales.

#### 4.2 Resultados en la aplicación del modelo

El valor máximo de la EQ reportado para el mes de marzo de 2006 fue de 0,610 localizado en el tipo de vegetación de bosque de encino, ubicado en el estado de Jalisco, en la ecorregión 13.5 Sierra Madre del Sur, mientras el valor más bajo fue de 0,372 ubicado en selva baja caducifolia, en el estado de Oaxaca, en la ecorregión 14.5 Planicie costera y lomeríos del Pacífico sur. La media (0,494) y la mediana (0,488) son semejantes, mientras que no hay una moda específica, consecuentemente, no se puede hablar de un comportamiento normal. En cuanto a las medidas de dispersión la desviación estándar (0,050) y la varianza (0,002) son bajas, por lo que no hay gran dispersión de los datos, esto lo podemos constatar con el valor del rango (0,238). Por lo que se considera que en esta situación no hay valores extremos en la EQ. Existe una asimetría hacia los valores más bajos como lo indica el coeficiente de asimetría (0,414) y el histograma que se muestra en la figura 5, donde se observa que el mayor número de píxeles (23 %) se ubican en el intervalo de 0.480 a 0.500, seguido por el intervalo 0.420 - 0.460 con el 20 % y en tercer lugar el intervalo de 0.460 - 0.480 (15 %). El otro 25 % de los píxeles disminuye su concentración conforme aumenta la EQ, con un ligero aumento en el intervalo de 0,560 a 0,580. Estos resultados indican que la EQ fue principalmente baja.

El mes de marzo es uno de los meses más secos a lo largo del año, y es cuando se reportan un gran número de incendios forestales en México. No obstante, dentro del territorio existen gran diversidad de ambientes regidos por el clima y el relieve. La distribución espacial de los valores de la EQ obedece a la distribución de la humedad, como se muestra en la figura 5. En ella se observa que los valores altos de la EQ (mayores de 0,500, se considera de esta manera porque indica que el 50 % de la vegetación se quemó) se distribuyen a lo largo de las tres ecorregiones que integran el área de estudio, principalmente en los intervalos de precipitación más bajos reportados en el área (600 - 800 mm y de 800 - 1200 mm). Mientras los valores bajos de la EQ tienden a presentar mayor concentración en los intervalos de 1200 mm - 1500, 1500 - 2000 mm e incluso en 2000 - 2500 mm. A manera de ejemplo se cita a la ecorregión 15.2 Planicies y lomeríos de la península de Yucatán, donde se observa claramente la distribución señalada. En esta ecorregión los incendios forestales se relacionan con las actividades agropecuarias y afectan al bosque tropical.

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>



**Figura 5. Eficiencia del quemado en áreas quemadas de marzo, 2006**

## 5. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos en la definición del modelo se consideran satisfactorios, tomando en cuenta las situaciones que a continuación se mencionan: a) la diferencia entre la resolución espacial de los productos satelitales (250 m) y la dimensión de la parcela tipo (100 x 200 m), esto se comprueba con la figura 3 donde se observa que los valores más bajos de la EQ observados en las quemadas controladas, se alejan más de la curva de correlación, porque el fenómeno es de menor dimensión, lo que dificulta su registro en el tamaño del píxel utilizado. b) Posibles omisiones por la evaluación de la calidad de los datos en los índices de vegetación y modelos de humedad. En México, la presencia de nubosidad es alta, principalmente en la ecorregión 15.2 Planicie y lomeríos de la península de Yucatán, situación que influye en la calidad de los productos a usar, porque disminuye el número de observaciones adecuadas. c) El factor más importante es la dependencia de la EQ con las diferentes condiciones ambientales como los tipos de vegetación y condiciones de humedad.

Los intervalos de predicción obtenidos indican que la estimación de la EQ, con este modelo, presentará mayor incertidumbre en los bosques tropicales, mientras en los bosques templados será menor, entretanto en los pastos y matorrales será intermedio. El comportamiento se debe a la diversidad de especies en los diferentes bosques y a las condiciones ambientales que prevalecen durante la acción del fuego. Los bosques templados presentan menor diversidad de

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

especies, por lo que se espera que el comportamiento sea similar entre los diferentes bosques, mientras las selvas tienen mayor diversidad y en general presentan los tres estratos de vegetación (arbóreo, arbustivo y herbáceo), distribución vertical que influye en la propagación del fuego. La excepción es la selva alta, donde hay más especies, pero en este caso la humedad, que caracteriza a este tipo de vegetación, influye en la EQ. En el caso de los pastizales su comportamiento es muy variable, por ser el tipo de combustible más ligero. Por otra parte, es importante mencionar que los sitios de las quemas se encuentran distribuidos en zonas serranas, con excepción de la ecorregión 15.2 Planicies y lomeríos de la península de Yucatán, que influye en el comportamiento del fuego.

Los resultados obtenidos en la aplicación del modelo para el mes de marzo de 2006, fueron comparados con datos disponibles en la literatura, así como los utilizados por la CONAFOR. En la tabla 1 se presentan los valores utilizados por la CONAFOR para los principales tipos de vegetación de México con presión de incendios forestales, como el bosque de pino (BP), bosque de encino (BQ), bosque de pino-encino (BPQ), bosque de encino-pino (BQP), selva baja (SB), selva mediana (SM), pastizal (P) y bosque mesófilo de montaña (BMM), así como los calculados en campo y los estimados para el mes de marzo de 2006.

**Tabla 1. Datos de eficiencia del quemado por tipo de vegetación**

	BP	BQ	BPQ	BQP	SB	SM	P	BMM
CONAFOR	0.75	0.71	0.74	0.74	0.96	0.5	s/d	0.81
CAMPO								
Mínimo	0.30	0.39	0.28	0.62	0.16	0.18	0.32	0.4
Media	0.52	0.59	0.44	0.64	0.43	0.34	0.60	0.5
Máximo	0.67	0.75	0.62	0.65	0.69	0.60	0.85	0.6
ESTIMADOS								
Mínimo	0.50	0.47	0.42	0.50	0.37	0.41	0.39	0.46
Media	0.51	0.57	0.48	0.54	0.47	0.50	0.45	0.49
Máximo	0.52	0.61	0.52	0.60	0.55	0.59	0.53	0.52

Fte. . Elaboración propia con datos de la CONAFOR (2014), del Dr. Flores Garnica y estimados por el modelo.

Los datos empleados por la CONAFOR pueden sobreestimar la eficiencia del quemado, debido a que los valores propuestos son más altos que los registrados en campo, por lo menos para las quemas analizadas en este trabajo. Mientras que los resultados obtenidos con la aplicación del modelo se ajustan a los valores de campo, debido a que son el insumo principal para el establecimiento del modelo. Como es de esperarse hay diferencias en los resultados porque corresponden a áreas diferentes.

Otro trabajo enfocado a estimar la EQ es el presentado por Oliva y Chuvieco (2011), para un caso de estudio en España, quienes establecen tres valores de EQ por tipo de vegetación y nivel de afectación en el área quemada, donde para el caso de coníferas consideran los siguientes valores: bajo (0,25), medio (0,42) y alto (0,57), estos resultados son comparables con los datos estimados para el mes de marzo 2006. Los mismos autores mencionan la necesidad de hacer en forma dinámica la estimación de la eficiencia del quemado.

Por otra parte, Rodríguez (2014) reporta los resultados de diversas investigaciones sobre el consumo del combustible muerto en quemas realizadas en diferentes tipos de vegetación. Para

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

---

el caso del bosque de pino, bajo condiciones ambientales y de especies diferentes, el promedio del consumo de combustibles leñosos y finos para un primer caso reportado en Chihuahua (1989) fuera del área de estudio, fue del 0,295 para la época de invierno y de 0,310 para la época de otoño. Los resultados para otras quemadas realizadas, en el estado de Jalisco (1991) cerca del área de estudio, considerando combustibles gruesos, medianos y finos, fueron de 0,886 y 0,829 para el mismo tipo de bosque. Para el caso de quemadas realizadas en bosque de pino-encino fue de 0,441 en los estados Coahuila, Puebla y Jalisco. Mientras para las selvas bajas, en lugares localizados dentro del área de estudio, en una primera investigación reportan 0,610 y para una segunda reportan 0,624 (considerando arbolado) con baja severidad y 0,802 con alta severidad. Considerando la diferencia de las fechas y sitios donde se realizaron las quemadas, los datos reportados por Rodríguez (2014) son una referencia útil para verificar los alcances de este trabajo.

Los resultados obtenidos de la aplicación del modelo se encuentran dentro del intervalo de los valores registrados en las quemadas documentadas y citadas en los párrafos anteriores, por lo que se consideran adecuados. De igual manera del análisis comparativo con los datos en la literatura, se deduce que los valores estimados con el modelo son conservadores con respecto a las otras fuentes. Debido a la falta de más datos de campo disponibles, que contribuyan a observar la variabilidad del comportamiento del fuego en diferentes ambientes y bajo condiciones diversas.

En consecuencia, es fundamental estimar la EQ en forma dinámica que considere las circunstancias en la fecha de la ocurrencia del fuego, para que, en la medida de lo posible se pueda ajustar el cálculo en forma particular, y disminuir la dependencia de los valores únicos que pueden sobrestimar el cálculo de emisiones, como en muchas ocasiones ocurre.

El método propuesto es una aproximación para estimar la eficiencia del quemado en forma uniforme considerando los cambios espaciales y temporales de las condiciones ambientales, en un territorio tan amplio y biodiverso como es el territorio mexicano. Sin depender de un valor único y estático. Además, el modelo cuenta con datos de incertidumbre que ayuda a interpretar la EQ en los diferentes tipos de vegetación e identificar donde habrá mayor incertidumbre. En este marco es preciso enfatizar que los trabajos realizados en campo son fundamentales para retroalimentar y mejorar el método propuesto. La implementación del algoritmo en el *RStudio*, realizada por el Mat. Julián Equihua, permite introducir, en forma ágil, más datos de campo que ayuden a mejorar el modelo. Por otra parte, si bien es cierto, no se contó con una validación de los resultados obtenidos de la aplicación del modelo, si fue posible compararlos con datos de referencia, y cabe recordar que el algoritmo *Radom Forest* tiene implícita la validación cruzada.

## 6. Conclusiones

El análisis realizado permitió diferenciar el comportamiento de la EQ en los diferentes ambientes, principalmente entre el templado y el tropical, que nos ayuda a concluir que la EQ no es aleatoria, porque depende del tipo y diversidad de la vegetación y las condiciones ambientales prevalecientes en el momento de la acción del fuego. El proceso para el establecimiento del modelo permitió definir los indicadores para estimar la EQ, los cuales se pueden clasificar en tres niveles temporales diferentes: a) estáticos, incluidos el tipo de vegetación y biomasa; b) dinámico anual los campos continuos de vegetación, y c) dinámicos como los modelos de humedad e índices de vegetación. De esta manera la estimación de la

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

eficiencia del quemado está en función de la localización espacial de la vegetación quemada y de la dinámica temporal de las variables consideradas. En conclusión, el modelo propuesto es una herramienta útil para estimar la EQ que considera la dinámica temporal de las variables involucradas, gracias a la disponibilidad de datos satelitales. No obstante, aún es necesario mejorar la resolución espacial y los productos satelitales que permita hacer un mayor acercamiento al fenómeno a estudiar.

## Referencias bibliográficas

- Ali, M. (2013): *Climate change impacts on plant biomass growth*. Netherlands, Springer.
- Alianza MREDD+ (2013): *Mapa y base de datos sobre la distribución de la biomasa aérea de la vegetación leñosa en México*. Versión 1.0. México, Woods Hole Research Center, USAID, CONAFOR, CONABIO, Proyecto México-Noruega.
- Anaya, J.A. (2009): *Estimación mensual de emisiones por biomasa quemada para Colombia basado en imágenes de satélite*. Tesis Doctoral. España, Departamento de Geografía Universidad de Alcalá.
- Barbosa, P. M., Stroppina, D., Grégoire, J. M. (1999): "An assessment of vegetation fire on Africa (1981-1991): Burned areas, burned biomass and atmospheric emissions", *Global Biogeochemical Cycles*. 13, 4, pp. 933-450.
- Bautista, F., Carbajal, N., Pineda, L. F. (2014): "Estimation of Total Yearly CO<sub>2</sub> Emissions by Wildfires in Mexico during the Period 1999-2010", *Advances in Meteorology*, 2014, pp. 1-8.
- Bocco, G., Mendoza, M., Priego, A., Burgos, A. (2009): *La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial, una revisión bibliográfica*. México, SEMARNAT, INE, UNAM, CIGA.
- Breiman, L. (2001): "Statistical Modeling: The Two Culture", *Statistical Science*, 16, 3, pp. 199-231.
- Breiman, L. (s/f): *Manual on Setting Up, Using, and Understanding Random Forest V3.1*. Berkeley, University of California [Consulta: 25-05-2016]. Disponible en [www.stat.berkeley.edu/~breiman/Using\\_random\\_forests\\_V3.1.pdf](http://www.stat.berkeley.edu/~breiman/Using_random_forests_V3.1.pdf)
- Cervera, A. (2009): *Implementación de un modelo para estimar la humedad en el combustible muerto basado en datos de sensores remotos*. Reporte de investigación para obtener el título de Licenciada en Ciencias de la Comunicación. México. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Colditz, R.R., Conrad, C., Wehrmann, T., Schmidt, M., Dech, S. (2008): "TiSeg: A Flexible Software Tool for Time-Series Generation of MODIS Data Utilizing the Quality Assessment Science Data Set", *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 46, pp. 3296-3308.
- Colditz, R.R., López, G., Maeda, P., Argumedo, J., Meneses, C., Victoria, A., Ornelas, J. L., Zermeño, C., Cruz, I., Ressler, R. (2012): "Generation and analysis of the 2005 land cover map for Mexico using 250 m MODIS data", *Remote Sensing of Environment*, 123, pp. 541-552
- CONAFOR, US Forest Service, Gobierno del estado de Chihuahua (2012): *Curso internacional de protección contra incendios forestales*. Zapopan, Jalisco, CONAFOR.
- CONAFOR (2014): *Manual de Información estadística de incendios forestales*. Zapopan, Jalisco, CONAFOR.

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

CONAFOR (2016): *Reporte semanal de resultados de incendios forestales. De 01 de enero al 17 de noviembre de 2016*. Zapopan, Jalisco, CONAFOR. [Consulta: 25-11-2016]. Disponible en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166400/Reporte\\_semanal\\_de\\_incendios\\_del\\_01\\_de\\_enero\\_al\\_17\\_de\\_noviembre\\_del\\_2016.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166400/Reporte_semanal_de_incendios_del_01_de_enero_al_17_de_noviembre_del_2016.pdf)

Csiszar, I., Arino O., Geraci, R., Giglio, L., Goldammer, J., De Groot, W., Justice, C., Kondragunta, Sh., Prins, E., Sessa, R., Tansey, K. (2009): *Fire disturbance Assessment of the status of the development of the standards for the terrestrial Essential Climate Variables*. Roma, GCOS.

Challenger, A. y Soberón, J. (2008): "Los ecosistemas terrestres", en Soberón, J., Halfer, G., Llorente, J. (Comps.): *Capital natural de México. Vol. 1: Conocimiento actual de la biodiversidad*. México, CONABIO, pp. 87-108.

Chuvieco, E. (2008a): "Satellite Observation of Biomass Burning", en Chuvieco, E. (Ed.): *Earth Observation of Global Change, The Role of Satellite Remote Sensing in Monitoring the Global Environment*. New York, Netherlands, Springer, pp. 109-142.

Chuvieco, E. (2008b): *Teledetección ambiental, la observación de la Tierra desde el espacio*. España, Ariel.

Chuvieco, E y Justice, C. (2008): "NASA Earth Observation Satellite Missions for Global Change Research", en Chuvieco, E. (Ed.): *Earth Observation of Global Change, The Role of Satellite Remote Sensing in Monitoring the Global Environment*. Netherlands, Springer, pp. 23-48.

Espinosa, D., Ocegueda, S., Aguilar, C., Flores, O., Llorente, J. (2008): "El conocimiento biogeográfico de las especies y su regionalización natural", en Soberón, J., Halfer, G., Llorente, J. (Comps.): *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*. México, CONABIO, pp. 33-65.

Fearnside, P. M., Lima de Alencastro, P. M., Alves, F. J. (2001): "Burning of Amazonian rainforest: burning efficiency and charcoal formation in forest cleared for cattle pasture near Manaus, Brazil", *Forest Ecology and Management*. 146, pp. 115-128.

Flores, J.G. y Gómez, L.P. (2009): "Efectos del fuego sobre la calidad del aire", en Flores-Garnica J.G. (Coord.): *Impacto Ambiental de Incendios Forestales*. México, Mundi-Prensa, pp. 277-292.

Flores, J.G., Xelhyantzi, J., Chávez, A. (2010): "Monitoreo del comportamiento del fuego en una quema controlada en un rodal de pino-encino", *Revista Chapingo, Serie Ciencias forestales y del ambiente*. 16, 1, pp. 49-59.

Garduño, R. (2004): "¿Qué es el efecto invernadero?", en Martínez, J. y Fernández, A. (Comps.): *Cambio climático: una visión desde México*. México, SEMARNAT-INE, pp. 29-40.

Giglio, L., Van der Werf, G.R., Randerson, J.T., Collatz, G.J., Kasibhatla, P. (2006): "Global estimation of burned area using MODIS active fire observations", *Atmospheric Chemistry and Physics*. 6, pp. 957-974.

Giglio, L., Loboda, T., Roy, D., Quayle, B., Justice, C. (2009): "An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor", *Remote Sensing of Environment*, 113, pp. 408-420.

Gobierno del Estado de México (2009): *Incendios forestales en el Estado de México y sus emisiones a la atmósfera*. Estado de México, Secretaría del Medio Ambiente.

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

Hansen, M.C., De Fries, R.S., Townshend, J.R.G., Sohlberg, R., Dimiceli, C., Carrol, M. (2002): "Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: examples using AVHRR and MODIS data", *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 303-319.

Hély, C., Alleaume, S., Swap, R. J., Shugart, H.H., Justice, C.O. (2002): "SAFARI-2000 characterization of fuels, fire behavior, combustion completeness, and emissions from experimental burns in infertile grass savannas in western Zambia", *Journal of Arid Environments*, 54, pp. 381-394.

INEGI, CONABIO, INE (2008): *Ecorregiones terrestres de México*. Escala: 1:1000000. México.

James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. (2013): *An introduction to Statistical Learning*. Nueva York, Springer.

Lima de Alencastro, P. M., Fearnside, P. M., Cerri, C. C. (1999): "Burning of Amazonia forest in Ariquemes, Rondônia, Brazil: biomass, charcoal formation and burning efficiency", *Forest Ecology and Management*, 120, pp. 179-191.

Magaña, V. (2004): "El cambio climático global: comprender el problema", en Martínez, J. y Fernández, A. (Comps.): *Cambio climático: una visión desde México*. México, SEMARNAT-INE.

Oliva, P. y Chuvieco, E. (2011): "Estimación de la eficiencia del quemado a partir de la severidad de quemado", en Recondo, C. y Pendás, E. (Eds.): *Teledetección, bosque y cambio climático*. XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección, 21 al 23 de septiembre de 2011. Asturias, España.

Oliva, P. (2013): "FEMM – Fire Effects Modeling and Mapping: An approach to estimate the spatial variability of burning efficiency", en Fernández, D. y Sabia, R. (Coords.): *Remote Sensing Advances for System Science the ESA Science Network: project 2009-2011*. Berlin, Springer. pp. 93-102.

Palacios, A., Parra, A., Chuvieco, E., Carmona, C. (2004): "Remote sensing and geographic information system methods for global spatiotemporal modeling of biomass burning emissions: Assessment in the African continent", *Journal of Geophysical Research*. 109, pp. 1-12.

Roberts, G., Wooster, M., Lagoudakis, E. (2009): "Annual and diurnal African biomass temporal dynamics", *Biogeoscience*, 6, pp. 849-866.

Rodríguez, D.A., Rodríguez, M., Fernández, F. (2002): *Educación e Incendios Forestales*. México, Mundi-prensa.

Rodríguez, D.A., Tchikoué, H., Santillán, J. (2007): "Emisiones contaminantes durante la temporada 2003 de incendios forestales", *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13, 1, pp. 33-39.

Rodríguez, D.A. (2014): *Incendios de vegetación, su ecología, manejo e historia*. México, Biblioteca básica de agricultura. Vol.1.

Roy, D. y Landmann, T. (2005): "Characterizing the surface heterogeneity of fires effects using multi-temporal reflective wavelength data", *International Journal of Remote Sensing*, 26, 19, 4197-4218.

RStudio Inc. (2014): *Statistical Data Analysis Manuals*. Version 0.98.1103 2009-2014

Sandberg, D.V., Ottmar, R.D., Peterson, J.L., Core, J. (2002): *Wildland Fire on Ecosystem: effects of fire on air*. U.S. Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

---

Schroeder, W., Ellicot, E., Ichoku, Ch., Ellison, L., Dickinson, M B., Ottmar, R D., Clements, C., Hall, D., Ambrosia, V., Kremens, R. (2014): "Integrated active fire retrievals and biomass burning emissions using complementary near-coincident ground, airborne and space borne sensor data", *Remote Sensing of Environment*, 140, pp. 719-730.

Seiler, W. y Crutzen, P. J. (1980): "Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning", *Climatic Change*, 2, pp. 207-247.

SMN (2017): *Estaciones meteorológicas automáticas*. México, Servicio Meteorológico Nacional. [Consulta: 31-01-2017]. Disponible en <http://smn.cna.gob.mx/es/emas>

Solano, R., Didan, J., Jacobson, A., Huete, A. (2010): *MODIS Vegetation Index User's Guide*, version 2, Collection 5.

Tobler, W.R. (1970): "A Computer Movie Simulation Urban Growth in the Detroit Region", *Economic Geography*, vol. 46, pp. 234-240.

Torero, J. (2013): "An introduction to combustion in organic materials", en Belcher, C. (Ed.): *Fire phenomena and the Earth System*. United Kingdom, WILEY-BLACKWELL, pp. 3-13.

Townshend, J., Hansen, M., Carrol, M., Di Miceli, Ch., Sohlberg, R., Huang, CH. (2011): *User Guide for the MODIS Vegetation Continuous Fields product*, version 1, Collection 5.

Van der Werf, G., Randerson, J., Giglio, L., Collatz G., Mu, M., Kasibhatla, P., Morton D., De Fries, R., Jin, Y., Van Leeuwen, T. (2010): "Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009)", *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, pp. 11707-11735.

Whelan, R.T., (1995): *The Ecology of Fire*. United Kingdom, Cambridge University Press.

Wigley, T., Jain, A K., Joos, F., Nyenzi, B., Shukla, PR. (1997): *Implicaciones de las propuestas de limitación de emisiones de CO2*. Documento técnico, Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.

Wiedinmyer, C., Quayle, B., Geron, C., Belote, A., McKenzie, D., Zhang, O'Neill, S., Wynne, K. (2006): "Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling", *Atmospheric Environment*, 40, pp. 3419-3432.

Wooster, M.J., Roberts, G., Perry, G., Kaufman, Y.J. (2005): "Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radioactive power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release", *Journal of Geophysical Research*, 110, pp. 1-24.

Cruz López, M. I. (2018): "Una aproximación para estimar la eficiencia del quemado usando productos satelitales. Caso de estudio: México", *GeoFocus (Artículos)*, n° 21, p. 119-143. ISSN: 1578-5157 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.562>

### Anexo 1.

Num.	Indicador o dato complementario	Unidad
1	Identificador único por sitio	Sin unidad
2	Biomasa (carbono)	tC/ha
3	% de cobertura del suelo, categoría sin vegetación, 2005	Porcentaje
4	% de cobertura del suelo, categoría vegetación no arbórea, 2005	Porcentaje
5	% de cobertura del suelo, categoría vegetación arbórea, 2005	Porcentaje
6	% de cobertura del suelo, categoría sin vegetación, 2006	Porcentaje
7	% de cobertura del suelo, categoría vegetación no arbórea, 2006	Porcentaje
8	% de cobertura del suelo, categoría vegetación arbórea 2006	Porcentaje
9	% de cobertura del suelo, categoría sin vegetación, 2007	Porcentaje
10	% de cobertura del suelo, categoría vegetación no arbórea, 2007	Porcentaje
11	% de cobertura del suelo, categoría vegetación arbórea, 2007	Porcentaje
12	Cobertura del suelo, 2005	Categorico
13	Cobertura del suelo, 2010	Categorico
14	Metros sobre el nivel del mar	Metros
15	Dirección predominante de la pendiente	Grados
16	Cantidad de luz reflejada cuando se recibe la energía del sur	0-1
17	Inclinación del terreno	porcentaje
18	Valor del EVI del compuesto inmediato anterior	Índice
19	Valor del EVI del compuesto correspondiente a la fecha de la quema	Índice
20	Valor del EVI del compuesto inmediato posterior	Índice
21	Diferencia relativa del EVI entre el compuesto inmediato anterior y posterior	0 - 1
22	Diferencia relativa del EVI entre el compuesto correspondiente y el inmediato posterior	0 - 1
23	Valor del NDVI del compuesto inmediato anterior	Índice
24	Valor del NDVI del compuesto correspondiente a la fecha de la quema	Índice
25	Valor del NDVI del compuestos inmediato posterior	Índice
26	Diferencia relativa del NDVI entre el compuesto inmediato anterior y posterior	0 - 1
27	Diferencia relativa del NDVI entre el compuesto correspondiente y posterior	0 - 1
28	Humedad del combustible muerto del día inmediato anterior	0 – 100 %
29	Humedad del combustible muerto (100 hr) del día correspondiente	0 – 100 %
30	Humedad del combustible muerto (100 hr) del día inmediato posterior	0 – 100 %
31	Humedad del combustible muerto (10 hr) del día inmediato anterior	0 – 100 %
32	Humedad del combustible muerto (10 hr) del día correspondiente	0 – 100 %
33	Humedad del combustible muerto (10 hr) del día inmediato posterior	0 – 100 %
34	Fecha de la quema (Complementario)	Fecha
35	Consumo del combustible registrado en los sitios de la quema	Ton/ha
36	Identificador de la zona de localización (complementario)	Numérico
37	Identificador para selección de los sitios (complementario)	Numérico
38	Identificador del tipo de vegetación en el sitio	Categorico
39	Combustible antes de la quema	Ton/ha
40	Combustible después de la quema	Ton/ha
41	Diferencia relativa del combustible = eficiencia del quemado	0 - 1

